

УДК 36.16.35+528.2:629.78

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Р.В. Комаров, А.Н. Фазрутдинова, И.С. Нугманов

Аннотация

Высокоточные геодезические ГНСС методы дают возможность определять координаты и скорости с миллиметровой точностью. Это позволяет приблизиться к пониманию процессов тектонических движений и атмосферных изменений. В данной статье рассматриваются результаты изучения вертикальных движений участка земной коры центральной части Республики Татарстан по данным мониторинга определяемых спутниковыми методами пространственных координат пунктов геодезической сети. В результате обработки и анализа спутниковых наблюдений выявлены временные вариации, которые носят периодический характер. Обнаруженная периодическая структура может быть следствием волновой пространственной структуры фундаментальных параметров атмосферы. Таким образом, пространственная и временная изменчивость параметров атмосферы является причиной возможной предельной точности в спутниковых дифференциальных измерениях.

Ключевые слова: геодезия, глобальные навигационные спутниковые системы, GPS, ГЛОНАСС, ионосфера, внутренние гравитационные волны.

Введение

Современный подход к геодезическим измерениям состоит в использовании пространственных методов измерений с применением в качестве опорных точек мгновенных положений искусственных спутников Земли. Измерительные комплексы получили название «Глобальные навигационные спутниковые системы» (ГНСС) GPS/ГЛОНАСС. В настоящее время подобные системы за счет совершенствования аппаратного и программного обеспечения и технологий использования применяются для решения геодезических задач. При этом необходимо учитывать возможные погрешности, обусловленные влиянием заряженной и нейтральной атмосферы как среды распространения радиоволн.

Влияние внешней среды на результаты измерений проявляется через изменение времени прохождения радиосигналов от спутника до приемных измерительных систем. Изменение времени распространения радиосигналов связано как с временными и пространственными вариациями параметров нейтральной атмосферы (температуры, давления, плотности, влажности) в интервале высот 0–60 км, так и с влиянием заряженной среды (ионосферы) на скорость распространения радиоволн на высотах выше 60 км.

Для уменьшения влияния ионизированной среды (ионосферы) используются измерения на двух частотах, что позволяет определить значение ионосферной поправки. Дополнительное ослабление влияния ионосферы и плотной нейтральной нижней атмосферы достигается за счет использования дифференциальных методов измерений [1]. Особенность этих измерений состоит в том, что при окончательных расчетах используется не абсолютное значение атмосферных задержек, а их разности, характерные для траектории радиолучей, соединяющих спутник

с двумя разнесенными на местности измерительными станциями. Наиболее эффективными методами борьбы с влияниями ионосферы являются методы, базирующиеся на двухчастотных дифференциальных фазовых измерениях. Эти методы позволяют измерять на местности линии различной протяженности с точностью, измеряемой сантиметрами и даже миллиметрами. Однако и в данном случае наблюдается понижение точности координатных измерений, обусловленное изменчивостью ионосферы. Здесь необходимо оценивать такие процессы, как солнечные вспышки, магнитные бури, которые имеют солнечное происхождение, и в какой-то мере их можно прогнозировать, но для ионосферы характерна изменчивость, обусловленная перемещающимися ионосферными возмущениями, которые вызывают пространственные неоднородности. Эти закономерности, в свою очередь, вызывают значительные погрешности. Таким образом, повышение точности спутниковых измерений связано с необходимостью внесения ионосферных поправок, что сопряжено с большими сложностями. Во-первых, глобальное распределение электронного содержания ионосферы изучено недостаточно и связано в определенной степени с трудностями учета возмущений типа ионосферных бурь. Во-вторых, большинство этих измерений выполнены методом, основанном на ионосферном эффекте Фарадея. Из-за влияния магнитного поля ошибка может достигать 20% и возрастает при измерении вдоль наклонных линий. Все это требует создания ионосферных моделей для глобального распределения ионосферных параметров, включая их пространственную и временную изменчивость. Уменьшение погрешности возможно при работе системы на двух частотах или при повышении рабочих частот до уровня 1.5 ГГц, поскольку время задержки в ионосфере изменяется обратно пропорционально квадрату частоты. В этом случае погрешность определяется в метрах. К уменьшению погрешности приводят также дифференциальные методы измерений. При этом при окончательных расчетах используются не абсолютные значения задержек, а их разности, характерные для траектории радиолучей, соединяющих спутник с двумя разнесенными станциями. Кроме того, наиболее точные измерения выполняются в ночное время и в период минимума солнечной активности.

Для учета влияния нейтральной внешней атмосферы используется модельное представление характеристик среды распространения радиоволн. Для систем позиционирования типа GPS наибольшее распространение получила модель Хопфилда [2]. В данной модели обоснована эмпирическая зависимость компонентов индекса показателя преломления от высоты. Значения компонентов показателя преломления для радиодиапазона могут быть определены через температуру, давление и влажность по известным формулам [1]. При этом значения температуры, давления, влажности берутся из стандартной модели атмосферы. Используемые формулы позволяют оценить суммарную атмосферную задержку, которая для зенитного направления равна 2.3 м, а на высоте около 10° над горизонтом это значение достигает 20 м. Влияние нижней атмосферы на результаты спутниковых измерений ослабляется при использовании дифференциальных спутниковых измерений. Однако накопленный к настоящему времени опыт спутниковых измерений свидетельствует о том, что при моделировании этот источник ошибок оказывается одним из основных при проведении высокоточных измерений.

Анализ результатов дифференциальных измерений, выполненных 19–26 июня 2006 г., показал следующее: измеренные и рассчитанные вертикальные координаты с использованием разнесенных пунктов измерений на расстояниях 1000–20000 м обнаруживают временные вариации, которые носят периодический характер. Обнаруженная периодическая структура может быть следствием волновой пространственной структуры фундаментальных параметров атмосферы. Волновые поля,

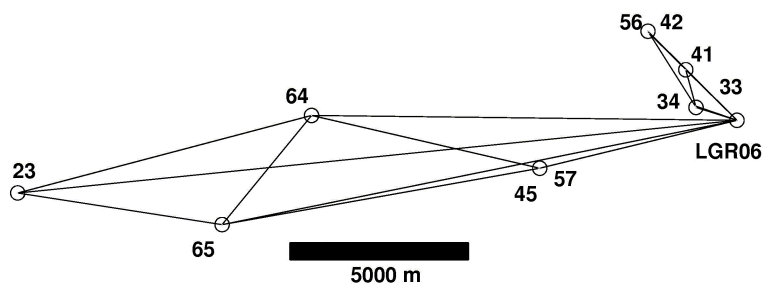


Рис. 1. Схема сети точек наблюдений 20 и 25 июня 2006 г.

характерные для атмосферы, формируются широким спектром волновых процессов. В данном случае наиболее важными являются внутренние гравитационные волны (ВГВ), возбуждаемые в нижней атмосфере метеорологическими, тектоническими явлениями, техническими взрывами и другими природными явлениями. ВГВ постоянно присутствуют в нижней атмосфере. Для них характерны также распространение и перенос энергии снизу вверх до ионосферных высот. Здесь ВГВ являются источником неоднородной структуры ионосферы, которая обнаруживает пространственную и временную изменчивость [3].

Разнос точек измерения выполняет роль пространственной фильтрации. В результате основной вклад во временные вариации, выполненные по дифференциальной методике измерений, вносят ВГВ с длинами волн $\lambda \approx 2d$, где d – расстояние между точками измерений.

Пространственная и временная изменчивость параметров атмосферы является причиной возможной предельной точности выполняемых измерений в конкретный момент времени. Ошибка измерений может быть уменьшена за счет осреднения на интервалах измерений, которые определяются исходя из требования решаемых задач.

1. Методика выполненных измерений и первичной обработки данных

1.1. Описание наблюдений. Исследуемая территория находится в центральной части Республики Татарстан. Выбор расположения геодезических пунктов геополигона осуществлялся с учетом данных региональных геофизических исследований (гравиметрические, магнитные и сейсмические данные), а также с учетом особенностей наблюдений спутниковыми методами, требующих максимально открытого небосвода для обеспечения прямой видимости спутников.

Наблюдения на пунктах геодезической сети, включающей 36 точек и покрывающей территорию в 110 кв. км, выполнялись шестью спутниковыми приемниками TOPCON GB-1000 в период 19–26 июня 2006 г. методом непрерывного накопления фазовых измерений сигналов созвездия спутников глобальной навигационной спутниковой системы GPS. Длительность сеанса наблюдений составила в среднем 11 ч. При наблюдениях использовались следующие предустановки приемников:

- угол отсечки спутников – 10° ;
- интервал записи спутниковых сигналов – 15 с.

Антенны приемников ориентировались специальным образом и центрировались над пунктами, высота антенны измерялась по всему периметру антенны и затем усреднялась.

Базовая станция (LGR06) привязывалась к ближайшим пунктам международной сети IGS (ARTU, MDVJ, MOBN).

Табл. 1

Уравненные координаты пунктов спутниковой сети

Имя	Широта	Долгота	Геодезическая высота, м
33	55° 34' 23.31325''	50° 42' 39.16605''	155.833
34	55° 34' 24.55874''	50° 42' 38.00687''	156.436
41	55° 34' 57.11530''	50° 42' 22.61751''	147.282
42	55° 35' 29.96524''	50° 41' 23.70779''	137.051
56	55° 35' 31.62003''	50° 41' 21.90707''	138.029
23	55° 33' 02.42775''	50° 24' 36.41458''	132.442
45	55° 33' 28.00316''	50° 38' 27.42958''	141.393
57	55° 33' 27.89290''	50° 38' 29.97253''	140.119
64	55° 34' 14.20240''	50° 32' 24.88979''	157.981
65	55° 32' 35.39181''	50° 30' 03.26414''	154.256
LGR06	55° 34' 11.82472''	50° 43' 44.71360''	166.257

В данной статье будет рассматриваться только часть наблюдений, полученных 20 и 25 июня 2006 года, схема расположения пунктов спутниковой сети представлена на рис. 1.

Окончательная обработка измерений производилась с использованием точных эфемерид спутников путем вычисления отдельных линий программой TOPCON TOOLS 6.04. Основные результаты статической обработки представлены в табл. 1. Внутренняя точность векторов составляет 0.001–0.003 м для расстояний между станциями до 5000 м и 0.005–0.015 м для расстояний 20000 м. Качество полученных наблюдений можно оценить по невязкам в замкнутых фигурах, а именно по незакрытиям в треугольниках, сторонами которых являются вектора между наблюдаемыми точками.

Средние значения невязок полигонов по плановым координатам составляют 0.0074 м, а по высоте – 0.0188 м. Максимальные значения этих величин примерно в 4 раза больше. Большие невязки относятся к измерениям с непродолжительным временем наблюдений, поскольку не всегда удавалось получать непрерывные записи в течение всего сеанса измерений. Окончательным результатом обработки спутниковых измерений является ведомость уравненных координат пунктов (см. табл. 1).

В результате обработки спутниковых наблюдений получены высокоточные координаты 11 точек сети. По данным программы обработки, внутренняя точность, характеризуемая точностью вычисления отдельных линий, в плане достигает 0.001 м и по высоте 0.002 м. Внешняя точность, характеризуемая невязками плановых и высотных координат в замкнутых полигонах сети, оценивается для плановых координат на уровне 0.0074 м, а для высот – 0.0188 м.

Для выявления короткопериодических смещений пунктов по результатам спутниковых наблюдений необходимо получить временные ряды координат этих пунктов. Для этого файлы вышеописанных статических измерений необходимо преобразовать в файлы непрерывной кинематики и провести обработку с определением координат пункта с интервалом 15 с, равным интервалу записи спутниковых сигналов. В результате обработки получены временные трехмерные ряды с интервалом 15 с для 10 точек относительно базовой станции LGR06, положение которой в процессе обработки принималось постоянным. В дальнейшем нас будет интересовать изменение высотной компоненты исследуемых пунктов.

1.2. Методика обработки выполненных измерений. В работе представлена методика выделения энергетически значимых периодичностей, оценки их ам-

плитуд, фаз и погрешностей при исследовании временных вариаций высотной компоненты координат пунктов спутниковой сети по результатам обработки дифференциальных измерений.

Исследуемое явление представляется некоторой математической моделью $f(x)$. Вид зависимости $y = f(x)$ запишем в виде разложения по гармоническим составляющим

$$\begin{aligned} f_m(t) &= \sum_{i=1}^m u_i \cos(\omega_i t - \varphi_i) = \sum_{i=1}^m u_i \cos \varphi_i \cos \omega_i t + \sum_{i=1}^m u_i \sin \varphi_i \sin \omega_i t = \\ &= \sum_{i=1}^m \theta_{2i-1} \cos \omega_i t + \sum_{i=1}^m \theta_{2i} \sin \omega_i t, \end{aligned}$$

где $\theta_{2i-1} = u_i \cos \varphi_i$, $\theta_{2i} = u_i \sin \varphi_i$, u_i , ω_i , φ_i – амплитуда, частота и фаза i -й гармонической составляющей разложения, m – порядок модели.

Если известны коэффициенты θ_{2i-1} , θ_{2i} , можно определить значения амплитуд и фаз гармонических составляющих:

$$u_i = \sqrt{\theta_{2i-1}^2 + \theta_{2i}^2}, \quad \varphi_i = \arctg(\theta_{2i}/\theta_{2i-1}), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

Как видно из (1), для описания функции $f(t)$ необходимо $2m$ параметров θ .

Результаты измерений y_1, y_2, \dots, y_n в математической модели представляются как

$$y_{m,j} = f_m(t_j) = \sum_{i=1}^m \theta_{2i-1} \cos \omega_i t_j + \sum_{i=1}^m \theta_{2i} \sin \omega_i t_j, \quad j = 1, \dots, n.$$

Обычно частоты ω_j неизвестны. Для определения их используют цифровой спектральный анализ. Предположим, что при помощи дискретного преобразования Фурье (ДПФ) вычислены частоты $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$. Тогда для оценок амплитуд и фаз можно применить регрессионный анализ [4]. До применения ДПФ рекомендуется исключить тренд вида $a + bt$ из ряда наблюдений.

В качестве критерия различия между экспериментальными значениям y_j и математической моделью $f_m(t_j)$ принимают минимум среднеквадратической ошибки

$$\min_{\theta} \sum_{j=1}^n \left[y_j - \left(\sum_{i=1}^m \theta_{2i-1} \cos \omega_i t_j + \sum_{i=1}^m \theta_{2i} \sin \omega_i t_j \right) \right]^2. \quad (2)$$

За значения оценок $\hat{\theta}_k$ принимают те значения θ_k , которые минимизируют форму (2). Произведем дифференцирование по θ_k , $k = 1, 2, \dots, 2m$, суммы в выражении (2) и приравняем его нулю. В результате имеем систему линейных уравнений относительно параметров θ :

$$\mathbf{Z}^T \mathbf{Z} \boldsymbol{\theta} = \mathbf{Z}^T \mathbf{Y},$$

где $\boldsymbol{\theta}^T = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{2m})$, $\mathbf{Y}^T = (y_1, y_2, \dots, y_n)$,

$$\mathbf{Z} = \begin{pmatrix} \cos \omega_1 t_1 & \sin \omega_1 t_1 & \cdots & \cos \omega_m t_1 & \sin \omega_m t_1 \\ \cos \omega_1 t_2 & \sin \omega_1 t_2 & \cdots & \cos \omega_m t_2 & \sin \omega_m t_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos \omega_1 t_{n-1} & \sin \omega_1 t_{n-1} & \cdots & \cos \omega_m t_{n-1} & \sin \omega_m t_{n-1} \\ \cos \omega_1 t_n & \sin \omega_1 t_n & \cdots & \cos \omega_m t_n & \sin \omega_m t_n \end{pmatrix}$$

Решением системы будет вектор коэффициентов $\hat{\theta}$, который является оценкой вектора θ . Используя формулы (1), получим оценки амплитуд и фаз:

$$\hat{u}_i = \sqrt{\hat{\theta}_{2i-1}^2 + \hat{\theta}_{2i}^2}, \quad \hat{\varphi}_i = \arctg(\hat{\theta}_{2i}/\hat{\theta}_{2i-1})$$

и восстановленный ряд \hat{y} по рассчитанным коэффициентам регрессии $\hat{\theta}$:

$$\hat{y}_{m,j} = \sum_{i=1}^m \hat{\theta}_{2i-1} \cos \omega_i t_j + \sum_{i=1}^m \hat{\theta}_{2i} \sin \omega_i t_j, \quad j = 1, \dots, n,$$

которые являются приближением к наблюдаемым значениям y_i в смысле минимума среднеквадратической ошибки. Разность $y_j - \hat{y}_{m,j}$, $j = 1, \dots, n$ определяет ошибку восстановления и зависит от числа параметров θ , которое может меняться от 1 до $2m$, где m может быть довольно большим. Возникает проблема выбора числа гармонических составляющих m для заданного приближения оценки $\hat{y}_{m,j}$ к $f(t_j)$ $j = 1, \dots, n$.

Ранжируем по убыванию все интенсивности гармонических составляющих ряда Фурье и для восстановления функции используем первые m_1 и $m_1 + 1$ членов этого ряда. Это значит для восстановления ряда необходимо $2m_1$ и $2m_1 + 1$ коэффициентов регрессии. Такой выбор числа гармонических составляющих позволяет выявить влияние интенсивности каждой последующей гармоники ранжированного ряда на суммарную интенсивность всех предыдущих гармоник. В этом случае статистику можно записать как

$$F(m_1, m_1 + 1) = \frac{\hat{\sigma}_{\hat{y}, m_1}^2 / 2m_1}{(\hat{\sigma}_{\hat{y}, m_1+1}^2 - \hat{\sigma}_{\hat{y}, m_1}^2) / 2},$$

где $\hat{\sigma}_{\hat{y}, m_1}^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_{m_1, i} - \hat{m})^2 / n$ – интенсивность восстановленного ряда, вычисленного по $2\theta_{m_1}$ параметрам регрессии, $\hat{\sigma}_{\hat{y}, m_1+1}^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_{m_1+1, i} - \hat{m})^2 / n$ – интенсивность восстановленного ряда, вычисленного по $2\theta_{m_1+1}$ параметрам регрессии, $\hat{m} = \sum_{i=1}^n y_i / n$ – среднее значение ряда y_1, y_2, \dots, y_n , $2m_1$ – число степеней свободы интенсивности $\hat{\sigma}_{\hat{y}, m_1}^2$, число степеней свободы разности $\hat{\sigma}_{\hat{y}, m_1+1}^2 - \hat{\sigma}_{\hat{y}, m_1}^2$ равно 2.

Поведение статистики $F(m_1, m_1 + 1)$ как функции m_1 определяется вкладом интенсивностей ранжированного ряда. Ввиду того, что гармонические составляющие ранжированного ряда расположены по убыванию, влияние последующих гармонических составляющих на все предыдущие будет ослабевать с увеличением числа используемых наиболее интенсивных гармоник. Этот факт используется для ограничения m_1 наиболее интенсивных гармонических составляющих ряда Фурье в целях достижения заданного приближения.

Статистика $F(m_1, m_1 + 1)$ распределена по закону Фишера с числом степеней свободы числителя – $2m_1$, знаменателя – 2.

Применим метод проверки статистических гипотез для выбора числа значимых гармонических составляющих m_1 из ранжированного ряда интенсивностей.

Предположим, что выбраны первые m_1 гармонических составляющих из ранжированного ряда интенсивностей. Выдвинем гипотезу H_0 о том, что выбранное число m_1 недостаточно для описания процесса $2\theta_{m_1}$ параметрами регрессии и требуется увеличить число гармоник. Альтернативной гипотезой H_1 является обратное утверждение: выбранное число m_1 достаточно для описания процесса $2\theta_{m_1}$ параметрами регрессии.

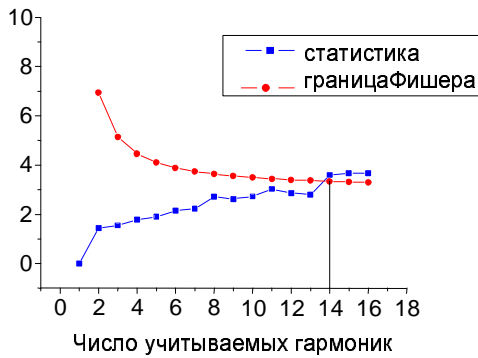


Рис. 2. Определение достаточного количества гармоник разложения в ряд Фурье

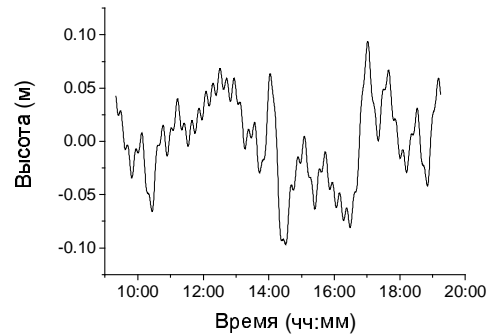


Рис. 3. Восстановленный сигнал изменения высоты со временем пункта № 23

Проверка гипотезы H_0 относительно альтернативной гипотезы H_1 производится путем сравнения статистики $F(m_1, m_1 + 1)$ с порогом $F_\alpha(m_1, m_1 + 1)$ (критическим значением), который зависит от уровня значимости α и степеней свободы $2m_1$ и 2. Решение о том, что m_1 гармонических составляющих из ранжированного ряда достаточно, принимается, если

$$F(m_1, m_1 + 1) \geq F_\alpha(m_1, m_1 + 1).$$

В противном случае принимается гипотеза H_0 . Вероятность принять гипотезу H_1 в то время, как верна гипотеза H_0 , равна

$$P(F(m_1, m_1 + 1) \geq F_\alpha(m_1, m_1 + 1) / H_0) = \alpha \quad (3)$$

где α — уровень значимости при проверке гипотезы H_0 относительно гипотезы H_1 .

Статистика $F(m_1, m_1 + 1)$ распределена по закону Фишера, и критическое значение $F_\alpha(m_1, m_1 + 1)$ можно определить как решение уравнения (3) или из таблиц [4] при заданном значении α . Придавая величине m_1 значения 2, 3, ... и учитывая, что числа степеней свободы статистики $F(m_1, m_1 + 1)$ равны $\nu_1 = 2m_1$, $\nu_2 = 2$, определим для каждого m_1 критическое значение $F_\alpha(m_1, m_1 + 1)$. Это множество критических значений $F_\alpha(m_1, m_1 + 1)$ представляет границу, с которой сравнивается статистика $F(m_1, m_1 + 1)$ для каждого m_1 . На рис. 2 представлено поведение критического значения $F_\alpha(m_1, m_1 + 1)$ при $\alpha = 0.05$. Пример изменения статистики $F(m_1, m_1 + 1)$ и момент остановки процедуры проверки статистических гипотез показаны на том же рисунке. Из рисунка видно, что достаточно иметь $m_1^* = 14$ наибольших интенсивностей гармонических составляющих разложения в ряд Фурье.

1.3. Анализ результатов измерений. Согласно описанной выше методике были обработаны все наблюдения полученные на 10 пунктах. Табл. 2 содержит основные результаты обработки и характеристики базовых линий. На примере пункта № 23 покажем основные результаты обработки. Рис. 2 содержит границу Фишера и значения статистик. На рис. 3 показан временной график восстановленного сигнала высотной компоненты. На рис. 4–13 представлены спектры временных вариаций восстановленных сигналов, отражающих временные вариации высотных координат для пунктов измерений, список которых представлен в табл. 1.

Табл. 2

Имя пункта	Длина линии, км	Время наблюдений, ч	Число учитываемых гармоник	% учитываемой интенсивности	Периоды, мин	Амплитуды, $\text{м} \cdot 10^{-3}$
33	1202.3	12.1	25	57.2	13–361	$1.51\text{--}6.44 \pm 0.2$
34	1233.4	11.9	55	65.6	4–716	$0.98\text{--}3.26 \pm 0.2$
41	2007.8	10	49	66.8	4–300	$1.22\text{--}5.22 \pm 0.2$
42	3455.9	11.6	55	71.169	4–696	$1.37\text{--}5.09 \pm 0.2$
56	3514.2	11.6	60	70.9	4–696	$1.37\text{--}5.39 \pm 0.2$
57	5681.2	13	6	57.4	52–776	$7.08\text{--}20.58 \pm 0.6$
45	5723.6	12.9	11	55.3	15–776	$4.79\text{--}5.33 \pm 0.5$
64	11913	11.5	9	66.7	29–688	$7.53\text{--}25.24 \pm 0.6$
65	14705	10.9	19	75.7	13–651	$6.24\text{--}19.89 \pm 0.6$
23	20241	9.9	14	73.2	13–594	$7.73\text{--}32.16 \pm 0.7$

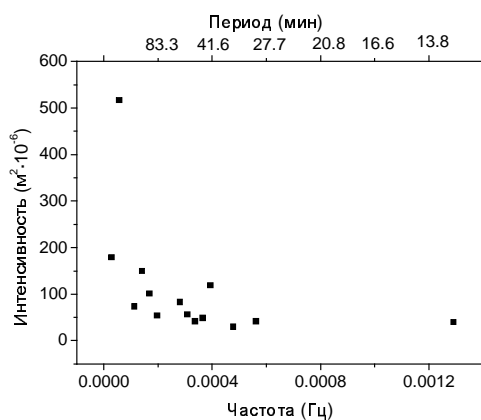


Рис. 4. Спектр восстановленного сигнала пункта № 23

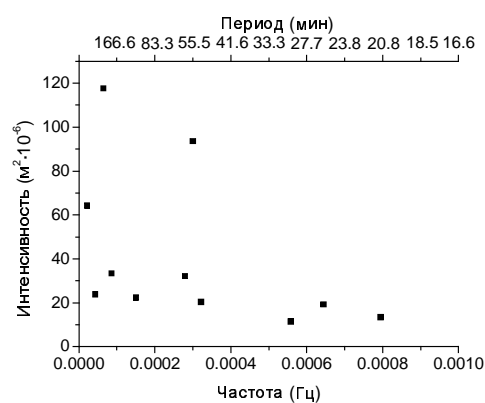


Рис. 5. Спектр восстановленного сигнала пункта № 45

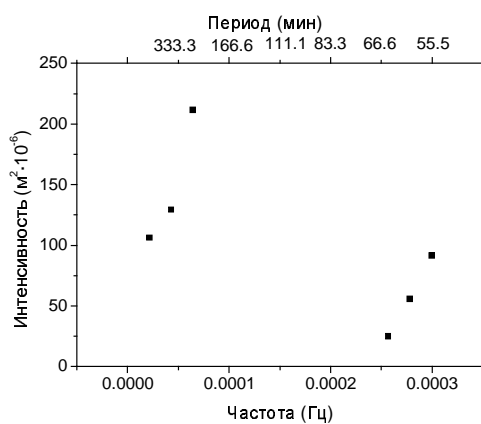


Рис. 6. Спектр восстановленного сигнала пункта № 57

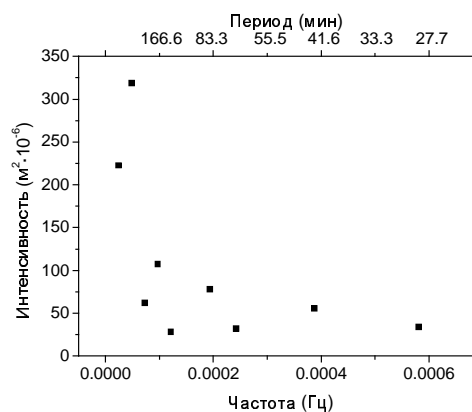


Рис. 7. Спектр восстановленного сигнала пункта № 64

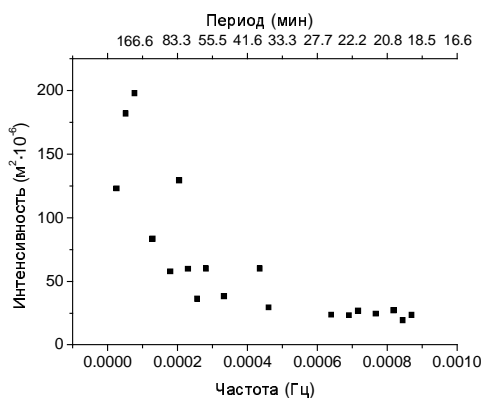


Рис. 8. Спектр восстановленного сигнала пункта № 65

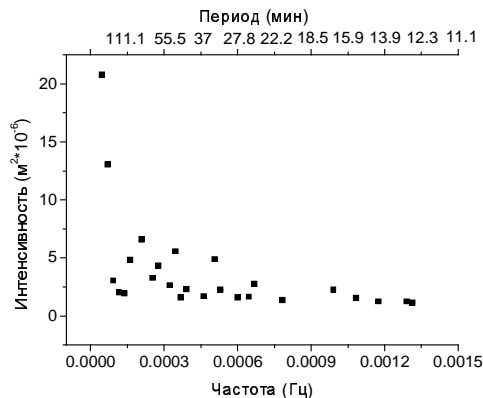


Рис. 9. Спектр восстановленного сигнала пункта № 33

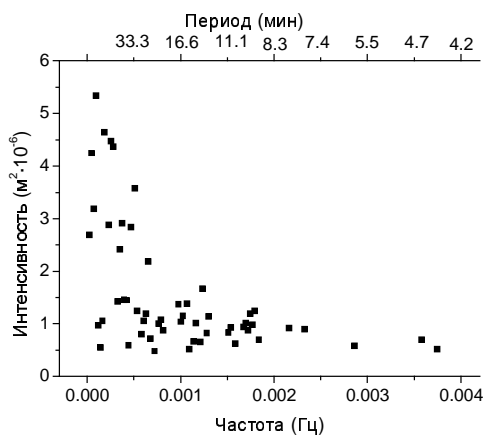


Рис. 10. Спектр восстановленного сигнала пункта № 34

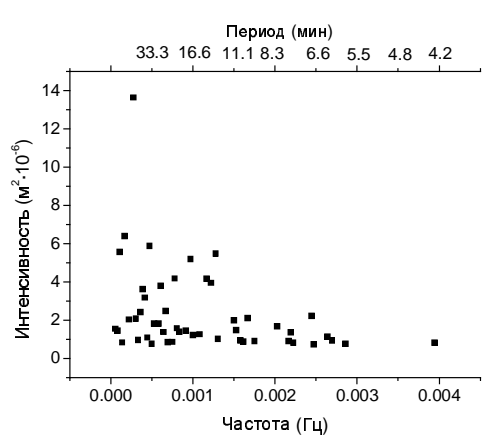


Рис. 11. Спектр восстановленного сигнала пункта № 41

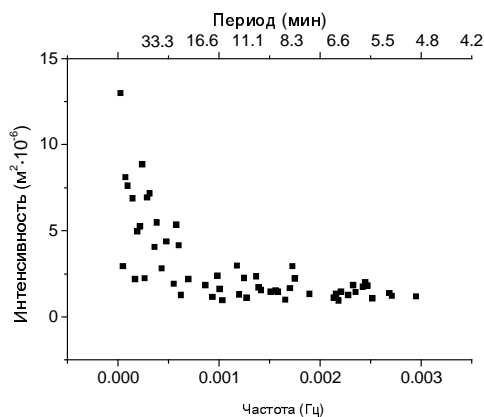


Рис. 12. Спектр восстановленного сигнала пункта № 42

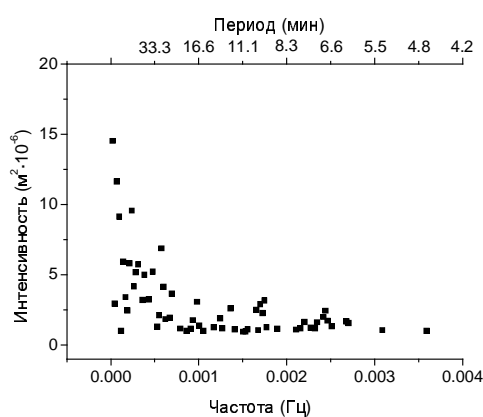


Рис. 13. Спектр восстановленного сигнала пункта № 56

2. Обсуждение результатов

На основе анализа выполненных расчетов установлено следующее. При малых расстояниях между пунктами измерений (1000–3000 м) наиболее интенсивными временными вариациями высотных компонент исследуемых пунктов являются периодичности менее 1 ч с амплитудами около 4 мм. При расстояниях 6000–20000 м наиболее интенсивными оказываются периодичности с временными масштабами от 1 до 12 ч и амплитудами 15–30 мм. Таким образом, установленный нами на основе анализа результатов дифференциальных спутниковых измерений диапазон частот соответствует временным масштабам колебаний высотной компоненты от нескольких минут до нескольких часов. Эти масштабы характерны для ВГВ. Физическая природа ВГВ связана с возникновением колебаний в атмосфере за счет термодинамических процессов и сейсмоколебаний поверхности земли. По методике дифференциальных измерений диапазон горизонтальных длин волн ВГВ для установленного диапазона частот и соответствующих периодов колебаний от одного до нескольких часов лежит в пределах 2–40 км. О справедливости этой гипотезы свидетельствуют результаты исследований длинных рядов синхронных микробарографических и сейсмографических наблюдений в Санкт-Петербурге [6] и обнаружение синхронных спектров в диапазоне частот, соответствующих периодам 0.7–1.5 ч и 2.5–5 ч для разных сезонов года. При этом установлены устойчивые частоты, общие для смежных геосфер. Эти устойчивые частоты могут резонансно возбуждаться высокими гармониками суточного цикла в температуре и давлении атмосферы и в температуре земной поверхности, поскольку обнаруженные частоты близки к частотам высоких гармоник упомянутых параметров.

3. Выводы

В работе предложена методика выделения значимых периодичностей при анализе временных вариаций дифференциальных спутниковых измерений. Методика основана на Фурье-разложении и использовании статистики Фишера при заданном уровне погрешности, равном 0.05.

Предложенная методика расчетов одновременно выполняет роль фильтрации анализируемых временных рядов ($F \leq 0.004$ Гц).

На основе проведенных измерений (июнь 2006 г.) и выполненных расчетов вариаций высотной компоненты установлены наиболее интенсивные гармоники колебаний с периодами менее часа и амплитудами около 4 мм, а также с периодами (1–12 ч) и амплитудами 15–30 мм. Подобные масштабы характерны для ВГВ, возникающих в атмосфере за счет термодинамических процессов и сейсмоколебаний поверхности Земли.

Пространственная и временная изменчивость параметров атмосферы является причиной возможной предельной точности в спутниковых дифференциальных измерениях. Ошибка измерений может быть уменьшена за счет осреднения на интервале измерений, который определяется требованиями решаемых задачи.

Summary

R.V. Komarov, A.N. Fahrutdinova, I.S. Nugmanov. Methodical Aspects of Satellite Measurements Accuracy Estimations.

Modern GNSS-techniques provide up to millimeter level precise point positions. This offers great opportunities for understanding tectonic movements and atmospheric status. This article presents the results of Earth surface research on local polygon by relative GNSS-measurements. Identified vertical displacements have a periodical structure, which may be main reason for wave principles in spatial fundamental parameters of atmosphere. So, spatial and timing variability

of atmosphere parameters are main reasons limiting accuracy of phase differential GNSS-measurements.

Key words: geodesy, global navigation satellite systems, GPS, GLONASS, ionosphere, inner gravitational waves.

Литература

1. *Генике А.А., Побединский Г.Г.* Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии. – М.: Картгеоцентр, 2004. – 355 с.
2. *Hopfield H.S.* Two-quadratic tropospheric refractivity profile for correction satellite data // J. Geophys. Res. – 1969. – V. 74, No 18. – P. 4487–4499.
3. *Фахрутдинова А.Н.* Волновая структура циркуляция нижней и средней атмосферы Земли. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2006. – 180 с.
4. *Фёрстер Э., Рёни Б.* Методы корреляционного и регрессионного анализа. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 302 с.
5. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
6. *Петрова Л.Н., Орлов Е.Г., Карпинский В.В.* Исследование сейсмогравитационных колебаний Земли [Электронный ресурс] // Науч. исслед. и проекты кафедры физики Земли СПбГУ. – Режим доступа: http://195.19.235.110/Science/Science_rezult_Seismo.html свободный.

Поступила в редакцию
25.02.08

Комаров Руслан Викторович – ассистент кафедры астрономии и космической геодезии Казанского государственного университета.

E-mail: Ruslan.Komarov@ksu.ru

Фахрутдинова Антонина Николаевна – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры радиофизики Казанского государственного университета.

E-mail: Antonina.Fahrutdinova@ksu.ru

Нугманов Ильдус Салихович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиофизики Казанского государственного университета.

E-mail: Idus.Nugmanov@ksu.ru